

断層を含む広域地盤の地震動シミュレーション

川西 智浩
 構造物技術研究部
 (耐震構造 研究員)

室野 剛隆
 同
 (同 主任研究員)



かわにし ともひろ むろの よしたか

はじめに

日本列島には、これまでにわかっているだけでも非常に多くの活断層が存在しており、それらの活断層の近くを走行している鉄道も少なくありません。したがって、地震が発生した場合の鉄道の安全性について調べる場合には、構造物や車両がどのような動きをするかを調べることも重要ですが、近くに存在する活断層の影響を考慮して各地点に到達する地震波をシミュレーションすることもポイントとなってきます。

断層付近における地震波をシミュレーションする場合、考慮すべきポイントとして、以下の2点が挙げられます。

- ・震源となる断層と、対象とする地点の両方が含まれるような、広域な地盤における波の伝わり方をシミュレーションできることが必要です。
- ・地表面付近の地盤では、地盤条件（例えば、地盤が硬いか軟らかいか）や地形が場所毎に変化するため、2つの地点が近接していても到達する波は異なります。したがって、そのような地表面付近の地盤条件や地形の影響を考慮できるシミュレーションであることが求められま

す。

しかし、現在の解析技術やコンピューターの性能を考慮すると、一度のシミュレーションで両方の要素を同時に評価することは不可能ではありませんが、解の安定性や計算効率という観点から難しいのが現状です。ここでは、両者の影響を別々に考慮して、地震波の評価を行うこととしました。つまり、図1に示すように、まず、(1) 地表面付近の地盤条件や地形の影響を考えずに、断層を含む地盤のモデルを作成して、地震波のシミュレーションを行います。次に、(2) 地表面付近の表層地盤だけの地盤モデルを作成し、最初のシミュレーションで得られた地震波をこのモデルに入力することで、地表面付近の地盤条件や地形の影響を加味した地震波をシミュレーションすることとしました。

断層を含む広域な地盤のシミュレーション方法

地震が発生した場合の鉄道の安全性について調べる際には、地震波そのもののシミュレーションだけでなく、その地震波が構造物をどのように揺らし、さらに構造物上を走行する車両がどのような動きをするかを調べる必要があります。

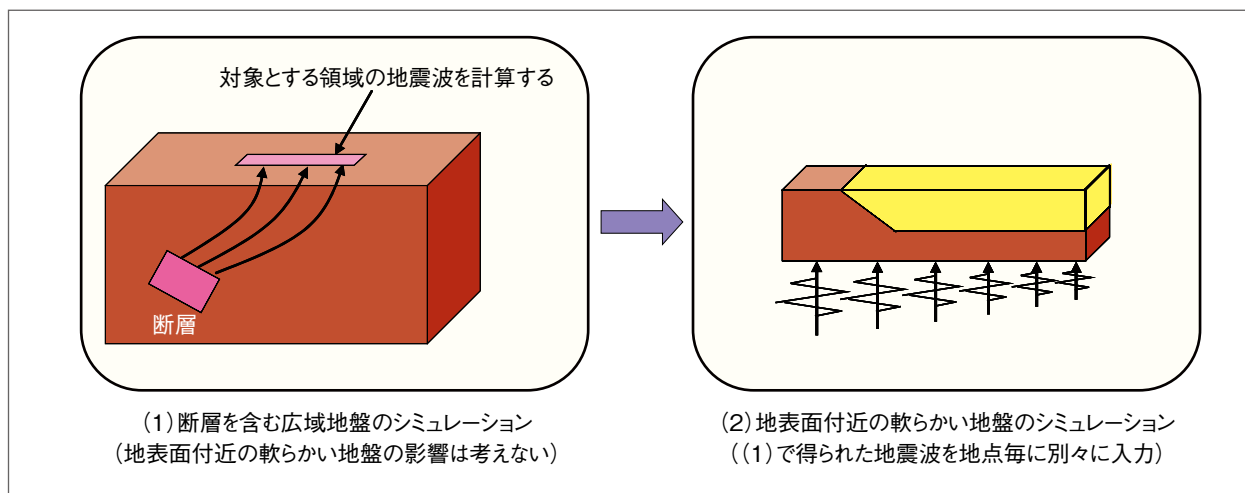


図1 シミュレーション方法のイメージ

ます。また、鉄道の路線は非常に長いため、これらの計算を何度も行って、どの地点に補強などの対策をすべきかを検討しなければなりません。以上の理由から、一連の検討には多くの時間が必要になります。よって、地震波のシミュレーションには計算のスピードが速いことや安定して計算できることが求められます。断層を含む広域な地盤における地震波をシミュレーションする方法はいくつかありますが、ここでは計算が速く、繰り返し計算に適した「剛性マトリクス法」¹⁾と呼ばれるシミュレーション方法を用いることとしました。

断層の近くにおける地震波の伝わり方

ここでは一例として、図2に示すような地盤を考えます。この地盤は、地表面付近の軟らかい地盤は考えておらず、

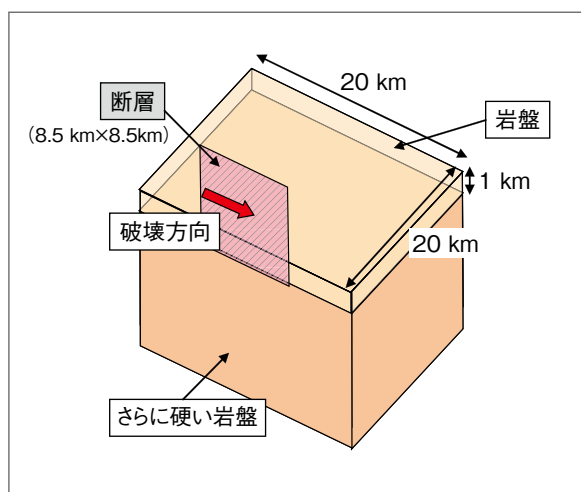
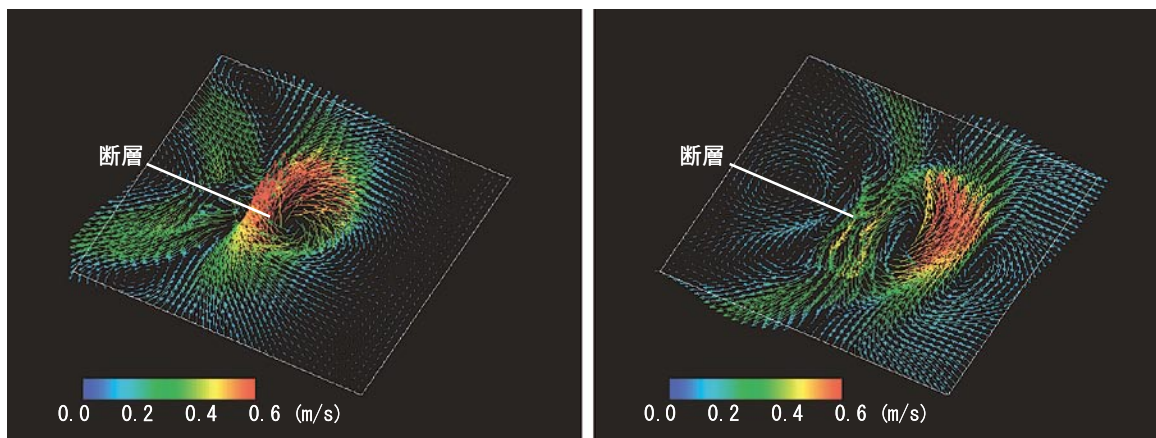


図2 断層を含む領域の地盤モデル

かなり深い位置にある硬い岩盤の部分だけを想定しています。その岩盤の中に大きさが8.5km×8.5kmの断層があると考え、この断層が破壊した場合（マグニチュードが6程度の地震を想定）の地震波のシミュレーションを実施しました。図3は、断層が破壊し始めてから4秒後と6秒後における、地表面の速度分布を示しています。まず断層が破壊してから4秒後に、断層の右端付近に時計回りの渦が表れており、さらに時間が経過すると、今度は反時計回りの渦が発生しています。このように、断層の近くでは地震波が複雑に伝わっていることがわかります。その結果として、それほど離れていない2地点で地震波の向きが逆になる場合もあります。そのような地点を鉄道が走行する場合には、連続する構造物が波を打ったように変形することが想定されるため、走行する車両にも大きな影響を及ぼす可能性があります。

(1) 地表面付近の地震波のシミュレーション方法

ここまでは、断層を含む岩盤領域の地震波の伝わり方を示しましたが、断層部分を除けば、地盤は平面方向に一般的な地盤と仮定していました。しかし、地表面付近の表層地盤は、地点毎に異なっているのが一般的です。例えば山間部やその周辺はかなり起伏に富んだ地形となっていますし、地盤が一見して平坦に見える場所でも、実際には周辺よりも比較的軟らかい土が堆積している場合があります。このような場所は一般的に揺れやすい地盤とされています。つまり、地表面に到達する地震波は、このような地表面付近の地形や地盤の状態に大きな影響を受けることになるため、地震波のシミュレーションを実施する場合にも、その影響を考慮する必要があります。



(a) 断層破壊開始から4秒後

(b) 断層破壊開始から6秒後

図3 地表面位置の速度分布

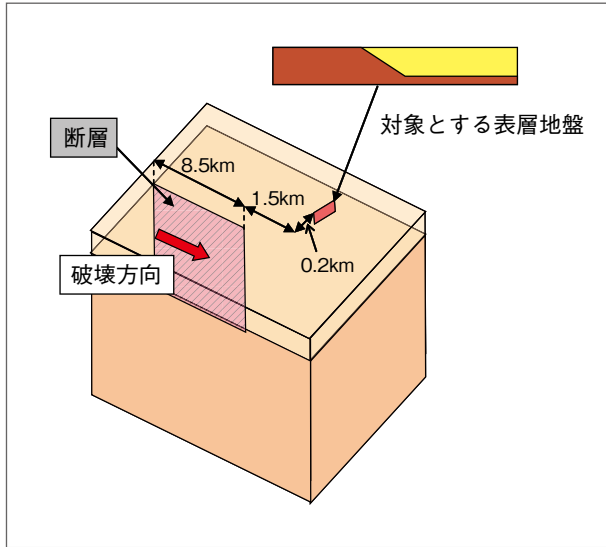


図4 想定した断層と表層地盤の位置関係

地表面付近の地盤が複雑に変化している場合、地盤の挙動をシミュレーションするのによく用いられる手法はFEM解析です。これは、地盤をメッシュ状に細かく分割し、メッシュ毎に地盤の物性を入力することで複雑な地盤をモデル化し、シミュレーションを実施するものです。ここでは、図4に示す位置に表層地盤がある場合を対象とし、図3で計算した地震波を表層地盤に入力してFEM解析を実施することにより、地表面付近の地震波のシミュレーションを実施します。

(2) 表層地盤における地震波のシミュレーション例

ここでは、断層からの波動の伝播の影響を考えた場合と伝播の影響を考慮せずに波を一様に入力した場合の結果を比較するため、図5に示す2つのケースのシミュレーションを実施します。ケース1は、図3で計算した地震波を対応する各地点に別々に入力するもので、断層付近の複雑な地震の伝わり方を考慮したケースになります。ケース2は、1地点の地震波を取り出し、その波をすべての地点に同じ波として入力するものです。また、両方のケースにおいて、図に示すような不整形地盤（硬い層が傾斜していて、その上に軟らかい層が堆積しているような地盤）を表層地盤として想定しました。

ケース1とケース2における加速度のコンター図を図6に示します。ここでは、断層破壊開始から4.5秒後から1秒間のコンター図を示しています。まず、すべての地点に同じ波を入力したケース2の結果を見ると、地盤の下方から上方に伝わる通常地震波とは別に、地盤の中央付近つまり硬い層が傾斜している部分で波が発生し、その波が水

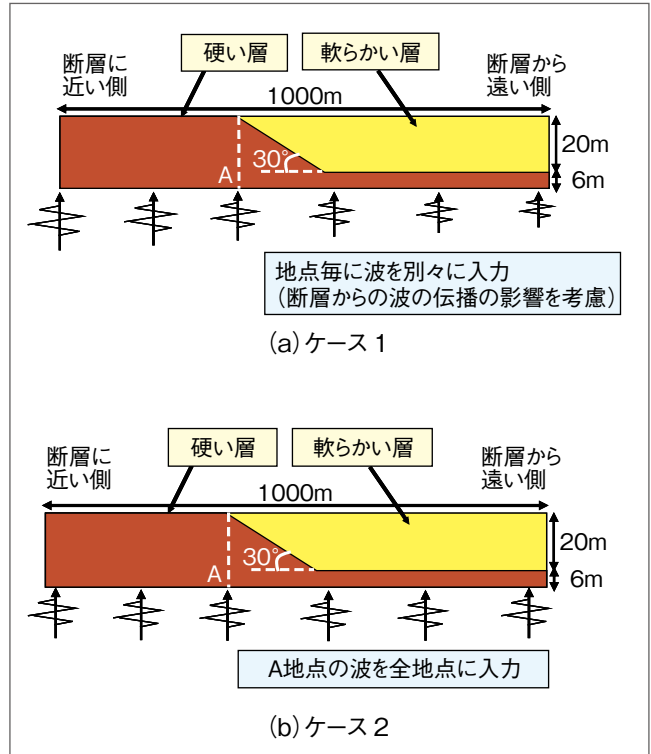


図5 解析ケース

平方方向に伝わっていることがわかります。この波の影響で、硬い層が傾斜している部分の周辺では、そこから遠く離れた地点に比べて大きな地震波が発生しています。しかし、その他の部分では、コンター図の線がほぼ水平方向に引かれており、これは地表面に到達する波がほとんど同じ波になっていることを示しています。

これに対して、地点毎に別々の波を入力したケース1の結果を見ると、地盤が水平に堆積している地点においても、コンター図の線が水平になっていないことがわかります。これは、断層から近い方が地盤の下側に波が早く到達することで、表層地盤内を伝わる波にも時間差が生じるためです。また図3で示したように、断層の近くでは地震波が渦を巻くように伝わることから、各地点に入力される波の形状が少しずつ変化していることも原因です。これに加えて、硬い層が傾斜している地点では、ケース2と同じように地盤の下方から上方に伝わる地震波とは別の波が発生して水平方向に伝わることから、この地点の周辺では地震波が非常に複雑に伝播していることがわかります。

つまり、断層の近傍に鉄道構造物が建設され、その構造物上を列車が走行するような場合には、構造物の揺れ方が複雑になり、列車の走行性にも影響を及ぼすことが想定されます。さらに、表層地盤が変化している地点では、その

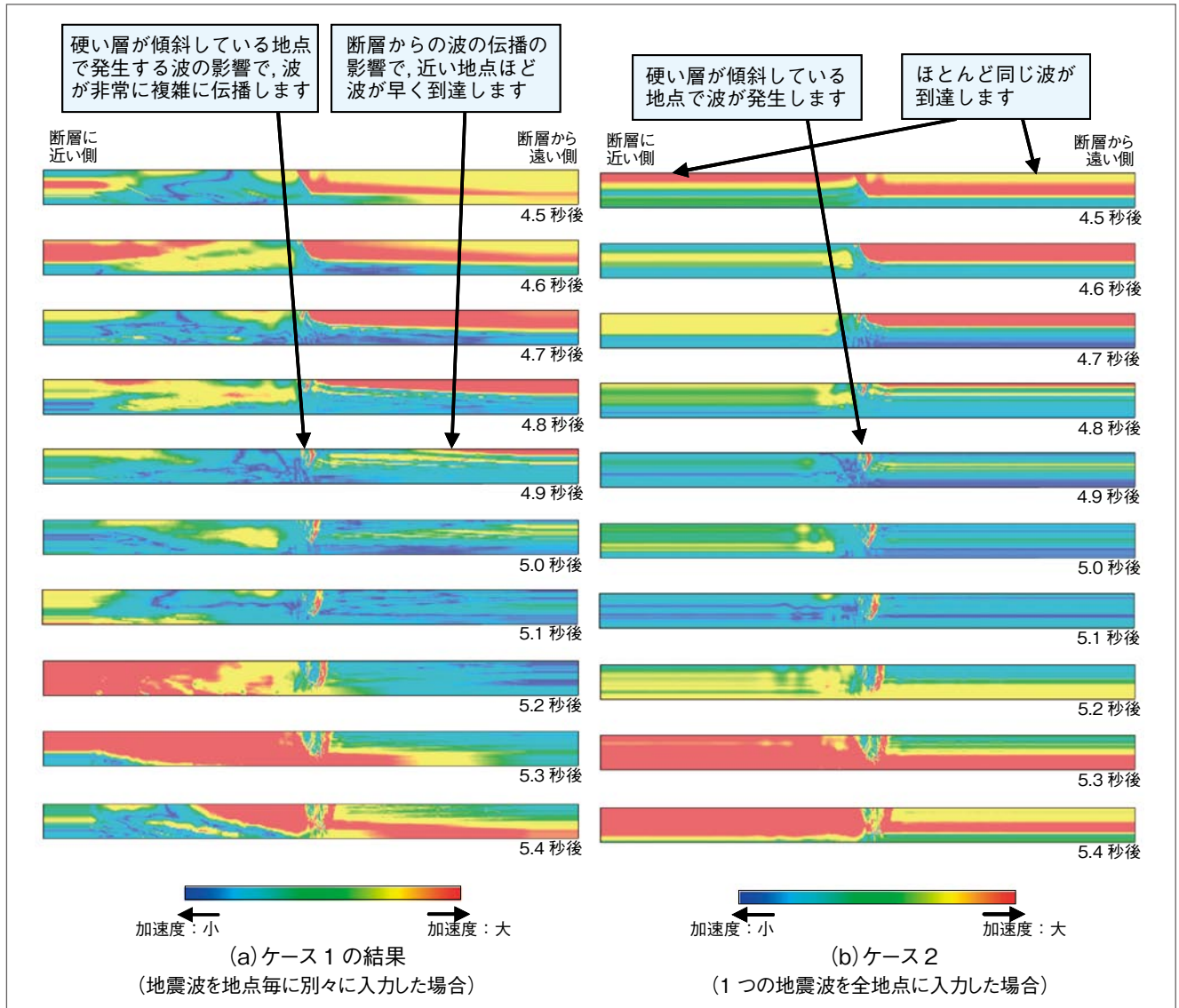


図6 地表面付近における地震波の伝播(縦方向の縮尺を3倍にして表示)

影響はさらに大きくなります。以上の結果を踏まえると、鉄道の安全性が確保されているかどうかを調べるためには、「鉄道が走行している付近に断層があるかどうか」と「鉄道が走行している地点の地表面付近の地盤はどのように堆積しているか」を調べ、その影響を考慮することが重要になります。

おわりに

走行中の列車が地震の影響で脱線した事例として、新潟県中越地震における上越新幹線のケースが挙げられますが、幸いにして人的な被害はありませんでした。しかし、近年、活断層の破壊による地震が国内外で多く発生しており、いつ鉄道が大きな被害を受けてもおかしくない状況にありま

す。今回紹介した断層の近くにおける地震波のシミュレーションの検討だけに留まらず、構造物や車両への影響も踏まえた鉄道の安全性について研究を進めていき、鉄道を地震から守るための対策を急ぐ必要があると考えています。

なお本研究の一部は、国土交通省からの補助金を受けて実施しました。RRR

文献

- 1) 原田隆典, 王宏沢: 剛性マトリクスによる水平成層地盤の波動解析, 地震2, Vol.57, pp.387-392, 2005